心理科学进展 2021, Vol. 29, No. 1, 93–101
Advances in Psychological Science

https://dx.doi.org/10.3724/SP.J.1042.2021.00093

肢体运动信息如何在工作记忆中存储? *

谢婷婷[1] 王丽娟[1] 王天泽[2]

([1]东北师范大学心理学院，长春 130024) ([2]广西师范大学教育学部，桂林 541006)

摘　要　肢体运动(空间位置运动与身体模式运动)是个体与环境交互作用的重要途径。以往行为学和脑成像研究分别探讨了空间位置运动信息和身体模式运动信息的工作记忆存储问题，发现两种肢体运动信息的存储均独立于语音环、视空间画板的视觉子系统，需要视空间画板的空间子系统的参与；两种肢体运动信息激活的脑区(运动相关皮层)独立于语音环、视空间画板的视觉子系统和空间子系统，并存在差异。这表明，现有的工作记忆多成分模型不能完全解释肢体运动信息的存储。据此可推论，工作记忆系统中可能存在一个负责处理肢体运动信息的“肢体运动系统”，其隶属于视空间画板，与视觉子系统和空间子系统并存；其激活脑区因肢体运动的不同而存在差异。

关键词　肢体运动信息，空间位置运动，身体模式运动，空间工作记忆，运动相关皮层

分类号　B842

1　引言

客体是视觉体验的基本单元，包含两类基本属性：表面特征属性(featural properties，如形状、大小、颜色等)和时空属性(spatiotemporal properties，如位置、距离、运动方向、运动速度等) (见李杰, 2010; Scholl et al., 1999)。为了保留这些客体信息，个体除了采用视觉编码外，有时还会进一步采用其他编码方式，例如使用言语复述该客体的名称(言语编码)或使用肢体操作该客体(操作编码)。当人们对客体采用言语编码时，除了客体的表面特征和时空信息外，大脑还会编码客体名称或客体运动(针对动态的客体)名称等言语信息。同样地，当对客体进行操作编码，例如伸手拿桌面上的苹果或模仿一个舞者的动作时，大脑也会编码伸手、抓握或弯曲等肢体运动所包含的肢体运动信息。这些肢体运动信息与言语信息将与客体表面特征信息及时空信息共同存储于大脑中，并产生后续的行为反应。

然而，目前工作记忆多成分模型研究主要集中于探讨客体表面特征、时空、言语信息的存储以及这些信息之间的绑定(e.g., Allen et al., 2015; Fellman et al., 2017; Logie, 1995; Son et al., 2020; Zhao et al., 2019)，未将肢体运动信息的存储纳入其研究范畴。而肢体运动是个体日常生活、学习以及工作的一部分，人们每天需要编码和提取各种肢体运动，探究肢体运动信息的存储有利于深入理解个体存储各类信息的模式，以及不同类型的信息如何相互转码、互动。Baddeley (2012)推测，工作记忆多成分模型中还应包含诸如触觉、动觉等信息，且可能存在特定的子系统存储触觉和动觉信息。因此，肢体运动信息在工作记忆中的存储问题是一个不可忽略的理论问题。基于已有的理论和实证依据，本文主要关注以下两个问题：肢体运动信息的存储涉及工作记忆系统中的哪个(或哪些)子系统，即它与语音环以及视空间画板有何关系？肢体运动信息存储的神经基础是什么？

Baddeley 和 Hitch (1974)采用双任务范式通过一系列实验提出了工作记忆的多成分模型。他们首先要求被试在执行言语推理主任务的同时进行一项音位相似性次要任务或视觉相似性次要任务，结果发现音位相似性次要任务干扰了言语推理绩效，而视觉相似性次要任务不影响言语推理

收稿日期：2020-01-06
* 教育部人文社科规划项目(1802123)资助。
通信作者：王丽娟, E-mail: wanglj699@nenu.edu.cn

绩效(实验 4)。随后，他们又探究了音位相似性对句子理解的影响，发现音位相似性次要任务影响了句子理解主任务的绩效(实验 7)。结合之前 Wickelgren (1965)的研究结果——视觉次要任务不影响言语推理和言语理解这两种主任务，以及 Baddeley, Grant 等人(1974)所发现的视觉追踪降低视觉图像的记忆广度而不影响音素的记忆广度，Baddeley 和 Hitch 提出工作记忆中存在语音环和视空间画板这两个单独的子成分分别用以存储听觉信息和视觉空间信息。在 Baddeley 等人开创性研究的基础上，肢体运动领域中的行为学研究也普遍采用双任务范式探究肢体运动信息与工作记忆各个子成分之间的关系。

在肢体运动的知觉与工作记忆研究领域中，研究者普遍分别探究空间位置运动与身体模式运动两种肢体运动，或将这两种肢体运动进行比较研究，而不是将所有肢体运动不加区别地研究。这是否意味着两种肢体运动的肢体运动信息在工作记忆中的存储机制存在差异？考虑到这一点，本研究分别阐述了两种肢体运动信息的存储机制，并对二者进行了比较分析。

2 空间位置运动与身体模式运动的区别

在阐述空间位置运动与身体模式运动的肢体运动信息(分别为空间位置运动信息与身体模式运动信息)的工作记忆存储机制之前，有必要先论述两种肢体运动的由来以及区别。在运动技能领域中，研究者普遍根据所涉及的身体部位将肢体运动分为涉及全身的大肌肉运动和主要涉及手部的精细肌肉运动(董奇，陶沙，2002)。然而，在知觉与工作记忆研究中未采用这一分类，而是采用另一种分类方法，该分类中每一种运动都可能是大肌肉运动或精细肌肉运动(Smyth et al., 1988; Smyth & Pendleton, 1989)。Smyth 等人(1988)依据运动目的的不同将肢体运动分为空间位置运动(position movement)与身体模式运动(patterned movement)。对于空间位置运动(比如拿起一支笔)而言，朝向外部空间中的目标所处的位置是其目的；对于身体模式运动而言(例如芭蕾舞姿势)，变换身体构型才是目的。

根据 Smyth 及其同事的观点，空间位置运动与身体模式运动还存在其他区别：第一，前者可由多个效应器执行，例如你可以用手推门，也可以用脚推门；后者只能用特定的身体部位产生运动，如芭蕾姿势中不能通过移动脚来耸肩；第二，对运动的精度要求不同。空间位置运动对运动精度要求较低，而身体模式运动对运动精度要求则较高；第三，身体部位与构型在两种肢体运动中的重要性不同。对于前者来说，肢体运动作为朝向空间中的某一位置的手段，是空间加工中的运动，身体部位与构型是次要的；对于后者而言，身体部位的构型最为重要；第四，空间位置的重要性不同。前者的目的在于到达空间中的目标，空间位置是关键因素之一；后者虽然也发生于空间中，但不参照空间位置。

此外，研究发现两种肢体运动的记忆加工相分离。Smyth 和 Pendleton (1989)要求被试在进行身体模式运动的工作记忆广度任务的同时进行一项身体模式运动抑制任务(即通过挤压软管反复改变手的构型)或空间位置运动抑制任务(即用食指敲击四个空间位置)，结果显示身体模式运动的工作记忆广度随着身体模式运动抑制任务的进行而减小，但不受空间位置运动抑制任务的影响(实验 1)。相反，当要求被试在这两种抑制任务条件下执行空间位置运动的工作记忆广度任务时，空间位置运动的工作记忆广度不受身体模式运动抑制的影响，而是随着空间位置运动抑制任务的进行而减小(实验 2)。结合上述分析可知，空间位置运动与身体模式运动不仅在表现形式上有差异，在记忆加工上也相互分离。这些区别为接下来阐述这两种肢体运动信息的工作记忆存储机制提供了理论基础。

3 空间位置运动信息的存储

最初，朝向空间目标的肢体运动任务被用于视空间测量(e.g., Farmer et al., 1986; Moar, 1978)，后来才被研究者们纳入肢体运动测量范畴(Smyth et al., 1988)。工作记忆多成分模型(Baddeley & Hitch, 1974)提出后，关于视空间测量，研究常采用两种方法操纵：第一种是呈现几个静态的客体(e.g., Wood, 2011)或移动的客体(e.g., Scholl et al., 1999)，要求被试记住这些客体的位置或位置变化的方向；第二种是呈现几个静态客体，要求被试移动手并记住手的位置变化，例如按顺序按按钮(Moar, 1978)、空间敲击(Farmer et al., 1986)等。第一种操纵测量的是客体的时空信息，属于视空间

测量范畴。但 Logie (1986)对第二种操纵提出了质疑，他指出主体将肢体朝向空间目标将导致视空间方面的测量变得困难，因为视空间测量针对的是客体的时空属性，而非主体的时空属性。确实如此，诸如按顺序按按钮等任务涉及了主体的肢体运动感觉体验，根据运动记忆的图式理论(Schmidt, 1975)，肢体运动感觉是肢体运动的重要组成部分，从这种意义上说，这些任务应该属于肢体运动测量范畴。此外，考虑到这些运动是肢体运动感觉与空间元素的结合，研究者认为应该更确切地将它们界定为空间位置运动(see Smyth et al., 1988)。

3.1　空间位置运动信息与视空间画板的关系

视空间画板分为空间子系统和视觉子系统，分别用以存储客体的时空信息和表面特征信息(Logie, 1995)。以往，空间位置运动工作记忆研究者普遍分别探究空间位置运动与空间工作记忆或与视觉工作记忆之间的联系。因此，要揭示肢体运动信息与视空间画板的关系，需要分别阐述肢体运动信息与空间子系统和与视觉子系统的关系。

3.1.1　空间位置运动信息与空间子系统的关系

虽然空间位置运动任务被用于肢体运动测量(see Smyth et al., 1988)、客体的位置或位置变化任务则被用于视空间测量(see Logie, 1995)，但是有研究发现，空间位置运动与空间位置的保持可能占用了相同的认知资源(e.g., Spiegel et al., 2013)。Spiegel 等人(2013)要求被试在执行空间工作记忆任务(学习并回忆位于 4×4 矩阵中的符号)的同时进行一项空间位置运动工作记忆任务(抓握物体并将其放置于目标位置)，结果显示，与无空间位置运动任务条件相比，执行一个准备好的运动以及重新计划该运动均降低了空间工作记忆绩效。Gunduz Can 等人(2017)从神经生理学层面考察了空间工作记忆与空间位置运动工作记忆之间的关系，他们采用了 Spiegel 等人(2013)的实验程序，并在单独的空间工作记忆任务条件和双任务条件下分别记录了空间工作记忆编码和提取过程的事件相关电位(event related potentials, ERPs)。行为学结果表明，空间位置运动工作记忆干扰了空间工作记忆；ERP 结果显示，双侧后部脑区(the bilateral posterior)只在执行双任务的编码过程中发生了改变——诱发了更负的波幅，表明空间位置运动的工作记忆任务影响了空间工作记忆的编码过程。

上述研究均证明，空间位置运动与空间子系统可能共享认知资源。有研究者分别探究了空间位置运动与空间工作记忆的神经基础，发现二者激活了相同的脑区，为这一推论提供了认知神经证据支持：

一方面，研究表明空间位置运动涉及运动相关脑区、小脑和顶叶皮层(主要是上顶叶)。Grafton 等人(1996)的正电子发射断层扫描(positron emission tomography, PET)研究发现，与观察物体相比，当要求被试用右手到达并抓住被照亮的圆柱形物体或指向该物体时，一些皮层和皮层下区域的局部脑血流量增加，这些区域包括对侧运动皮层(the contralateral motor cortex)、初级运动皮层(the primary motor cortex)、腹侧辅助运动区(the ventral supplementary motor area)、扣带回皮层(the cingulate cortex)、上顶叶(the superior parietal lobule, SPL)、枕背皮层(the dorsal occipital cortex)和左顶叶盖(the left parietal operculum)。类似地，Rizzolatti 等人(1996)比较了被试“抓握”物体的条件与两种“观察”条件(被试观察主试对物体的抓握动作以及被试只观看物体)下激活的大脑区域。结果显示右手抓握显著激活了左侧运动上皮层区(the left supramotor cortical areas)、左侧 SPL、双侧楔叶(the bilateral cuneus)、左侧壳核(the left putamen)和双侧小脑(the bilateral cerebellum)。另外，经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation, TMS)研究揭示了空间位置运动保持与运动皮层相关。例如，研究者在被试执行完一组空间位置运动任务后立即将 TMS 应用于被试的右侧初级运动皮层(the primary motor cortex, M1)或辅助运动区域(the supplementary motor area, SMA)，结果发现运动任务的保持受损，表明 M1 和 SMA 是空间位置运动保持的神经基础(Kantak et al., 2010)。

另一方面，空间工作记忆研究均发现客体的空间信息加工激活了顶叶区域(Koester et al., 2016; Tarantino et al., 2014)。进一步地，研究报告了后顶叶皮层(尤其是 SPL, see Cai et al., 2018)和额上回(the superior frontal gyrus, SFG)在长时间延迟(最大 6~9 s)期间被持续激活(Malhotra et al., 2009)。

这些脑成像研究显示，SPL 是空间位置运动与空间工作记忆共享的脑区，支持了行为学研究

结果，表明视空间画板中的空间子系统对于存储空间位置运动信息是必要的。但是，脑成像证据也表明，空间子系统对空间位置运动信息的存储不具有充分性，因为空间位置运动信息的存储还激活了运动相关皮层，这些运动相关皮层是空间位置运动信息的神经基础。为了探究空间位置运动信息的存储机制，还需要明确运动相关皮层是否在其他模态信息(客体的表面特征信息和言语信息)的工作记忆中也被激活，并据此判断空间位置运动信息是否独立存储于工作记忆系统中。

3.1.2 空间位置运动信息与视觉子系统的关系

Corsi 块敲击测验(the Corsi block-tapping task, CBT; Milner, 1971; Corsi, 1972)被广泛应用于视空间领域(Brunetti et al., 2016; Carvalho et al. 2014; Shah et al., 2013)，它包括三个版本，即标准版 CBT (standard version of the CBT)、二维版 CBT (two-dimensional version of the CBT)以及计算机版 CBT (electronic version of the CBT)。其中，标准版 CBT 装置由不规则排列在板上的相同块组成。首先由主试在随机呈现的、不断增加长度的序列中轻敲这些块，然后要求被试立即复制每个序列，直至出现错误。以正确再现的最长块序列来衡量绩效。由于涉及肢体运动，研究者普遍将标准版 CBT 作为空间位置运动任务(Claessen et al., 2015; Sdoia et al., 2019)。

Sdoia 等人(2019)的研究表明，空间位置运动工作记忆与视觉工作记忆相互分离。他们要求被试在无干扰或在视觉工作记忆干扰任务(识记并回忆发光二极管的颜色)下完成标准版 CBT 任务。结果显示视觉工作记忆干扰任务对标准版 CBT 的回忆没有影响。有脑成像研究为空间位置运动的存储与视觉子系统的分离关系提供了证据支持。研究发现，记忆人脸的特征信息激活了梭状回(the fusiform)、海马旁回(the parahippocampal)、下额叶(the inferior frontal)等脑区(Ungerleider et al., 1998)。然而，如前所述，这些脑区在空间位置运动任务中未被激活，这说明空间位置运动工作记忆与视觉工作记忆的神经基础是不同的。由此可知，空间位置运动信息的存储并不涉及视觉子系统，其引发的运动相关皮层的激活与视觉子系统无关。

3.2 空间位置运动信息与语音环的关系

自闭症谱系障碍(autism spectrum disorder, ASD)研究表明，空间位置运动工作记忆可能与言语工作记忆相分离(Grainger et al., 2016; Vogan et al., 2018)，为我们明确语音环与空间位置运动存储之间的关系提供了证据。Grainger 等人(2013)回顾了 13 项 ASD 者操作效应(指对词语进行操作编码比进行阅读编码的记忆效果更好，见 Cohen, 1981)的研究(这些研究共包含 239 名 ASD 者和 240 名对照者)，发现 ASD 组的操作效应与对照组的操作效应无显著差异(均差 = 0.1, Cohen's d = 0.11)。这说明，虽然 ASD 者的言语工作记忆受损(Vogan et al., 2018)，但其动作监控能力并未受损，他们能监测自己的动作并使其记忆加工从中获益(Williams, 2010)，暗示着空间位置运动信息的存储可能独立于语音环。

脑成像研究为空间位置运动信息的存储独立于语音环提供了证据支持。如前所述，空间位置运动主要涉及运动相关皮层和顶叶皮层，而宋伟等人(2011)采用功能性磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)技术揭示，言语工作记忆主要激活了颞顶枕交界处(the temporoparietal-occipital junction)和左额下回(the left inferior frontal gyrus)。这说明言语工作记忆与空间位置运动工作记忆所激活的脑区存在分离。结合空间工作记忆和视觉工作记忆的神经基础研究可知，空间位置运动工作记忆所激活的运动相关皮层不参与空间信息、客体表面特征信息和言语信息的工作记忆，这说明当前的工作记忆中存储单一模态信息的子系统(语音环以及视空间画板中的视觉子系统与空间子系统)都不涉及运动相关皮层。

综上所述，以朝向空间目标为目的的肢体运动信息的存储独立于语音环与视空间画板中的视觉子系统，需要视空间画板中的空间子系统的参与。并且，空间位置运动信息有其独特的神经基础，该神经基础可能位于工作记忆系统中一个额外的子系统——肢体运动系统中。

4 身体模式运动信息的存储

4.1 身体模式运动信息与视空间画板的关系

已有的脑成像研究探讨了身体模式运动与视空间画板中的视觉子系统、空间子系统的关系(Cai et al., 2018)，结果表明只有空间子系统参与以再现身体运动形态为目的的肢体运动信息的存

储，工作记忆系统中可能还存在一个保持身体模式运动的独特子系统。

Grèzes 等人(1999)以及 Rumiati 等人(2005)在探究身体模式运动加工涉及的大脑区域时发现中颞叶皮层(the middle temporal, MT)参与了有意义和无意义身体模式运动的加工；双侧迷走神经前运动区(the presupplementary motor areas, SMC)和额下回(the inferior frontal gyrus, IFG)参与身体模式运动的模仿与规划(Rizzolatti, 2005)。进一步地，Cai 等人(2018)比较了身体模式运动工作记忆与视觉及空间工作记忆的神经基础。他们测试了被试的身体模式运动工作记忆、空间工作记忆和视觉工作记忆能力，得出三个主要发现：一是个体进行身体模式运动工作记忆任务时，其双侧 MT 受到激活，且该区域与额—顶叶网络(the frontal–parietal network, FPN)的功能连接仅受运动记忆负荷的调节，不受客体表面特征或位置记忆负荷的调节；二是参与保持空间位置信息的大脑区域(即 SPL 和 SFG)也参与身体模式运动的保持过程；三是客体表面特征的相关脑区(即梭状回)在身体模式运动工作记忆任务中未被激活。Cai 等人(2018)的研究结果表明，身体模式运动工作记忆与视觉工作记忆的神经基础是分离的；身体模式运动的保持虽需要空间子系统的参与，但还激活了独立于视觉子系统和空间子系统的脑区 MT。研究为身体模式运动信息的存储独立于视空间画板中的视觉子系统、但依赖于空间子系统提供了支持性证据，并说明 MT 很可能是身体模式运动信息所独有的神经基础——为了检验这种可能性，需要观察 MT 在言语工作记忆中是否被激活。

虽然脑成像研究揭示了身体模式运动信息存储的神经基础，但目前关于身体模式运动信息与视空间画板之间关系的证据还较少，且尚没有直接的行为学研究证据，因此未来需要更多实证研究以进一步验证上述脑成像研究的结论。

4.2 身体模式运动信息与语音环的关系

如前所述，身体模式运动工作记忆激活了 SPL 和 SFG，也激活了独立于视觉和空间工作记忆的脑区 MT (Cai et al., 2018)，研究未发现这些脑区在言语工作记忆中被激活(见宋伟 等, 2011)。这表明 MT 是身体模式运动工作记忆所独有的神经基础，且身体模式运动工作记忆与言语工作记忆的神经基础是不同的，为身体模式运动信息的存储独立于语音环提供了支持性证据。

也有行为学研究支持了身体模式运动与言语工作记忆加工的分离。Smyth 等人(1988)要求被试同时执行身体模式运动与言语工作记忆广度任务，结果显示身体模式运动干扰任务抑制了身体模式运动工作记忆广度，但不影响言语工作记忆广度(实验 2)；相反，言语干扰任务只抑制言语工作记忆广度，而不影响身体模式运动工作记忆广度(实验 4)。类似地，Gimenes 等人(2013)要求被试只执行一种工作记忆广度任务(身体模式运动任务，见实验 1；言语记忆任务，见实验 2)并考察两种干扰任务(身体模式运动干扰与言语干扰)对其工作记忆广度成绩的影响，研究结果与 Smyth 等人的结果相一致。另外，Liu 和 Wang (2018)要求非手语者在识记动名词短语(例如“拉拉链”)的同时模仿以视频形式呈现的身体模式运动(即手语运动)，结果显示同时进行的手语运动不影响被试对短语的再认成绩。这些研究表明身体模式运动与言语加工可能是分离的。

预测和干预方面的研究也验证了身体模式运动与言语工作记忆加工分离的推论。Wu 和 Coulson (2014)要求被试在执行身体模式运动工作记忆任务的同时分别进行言语工作记忆、空间位置运动工作记忆和手势分类测试。结果显示：身体模式运动工作记忆与言语任务以及空间位置运动任务都无关；三种记忆任务中，只有身体模式运动工作记忆绩效能预测手势分类任务的绩效。Miyahara 等人(2008)以发展性协调障碍(developmental coordination disorder, DCD)和发展性运动障碍(developmental dyspraxia, DD)者为被试考查了言语标记策略的指导能否改善动作协调障碍和手势任务绩效。结果发现经过几年的干预后，言语标记指导对 DCD 和 DD 都未产生影响。

上述可见，行为学证据表明身体模式运动与言语工作记忆相互分离。脑成像数据显示身体模式运动的存储只激活了保持客体的空间信息的脑区，而没有激活保持客体的表面特征信息和言语信息的脑区；只有身体模式运动的存储激活了运动相关皮层——MT。这些结果共同说明，在现有的、存储单一模态信息的工作记忆两个子成分——语音环与视空间画板中，身体模式运动信息的存储独立于语音环，也独立于视空间画板中的视觉子系统，其需要视空间画板中的空间子系统参与，

此外，其存储涉及了工作记忆两个子成分均未激活的脑区。

5 总结

综上所述，行为学证据表明，目前普遍认可的工作记忆多成分模型中只有视空间画板的空间子系统能解释空间位置运动信息的存储问题；身体模式运动信息的存储尚不得而知，只明确其独立于语音环。目前尚缺乏身体模式运动工作记忆与空间工作记忆、视觉工作记忆之间关系的行为学证据，但幸运的是，有脑成像研究探究了身体模式运动工作记忆与空间工作记忆及与视觉工作记忆之间的关系(Cai et al., 2018)，弥补了行为学研究短缺的问题。

借助于脑成像研究可以定位肢体运动信息的神经基础，为肢体运动信息的存储提供直接证据。脑成像研究发现两种肢体运动信息的存储所激活的脑区均独立于言语、视觉工作记忆的脑区，与空间工作记忆共享脑区，这说明现有的工作记忆多成分模型中只有视空间画板的空间子系统与两种肢体运动信息的存储有关，验证了行为学结果。研究还发现，两种肢体运动信息均激活了独立于言语、视觉与空间工作记忆的脑区——运动相关皮层，但二者激活的运动相关皮层存在差异(空间位置运动激活对侧运动皮层、初级运动皮层、腹侧辅助运动区、左侧运动上皮层区以及右侧初级运动皮层等；身体模式运动激活中颞叶皮层)，这说明现有的工作记忆多成分模型不能完全解释肢体运动信息的存储问题。

综合已有的行为学和脑成像研究结果，本文推论工作记忆系统中可能还存在一个负责处理肢体运动信息的子系统——肢体运动系统，其激活脑区因肢体运动的不同而存在差异。Baddeley (2012)曾推测视空间画板是较低水平的缓冲区，不仅包含视觉子系统和空间子系统，还可能存在第三个子系统。在此基础上，我们进一步推测肢体运动系统可能隶属于视空间画板，与视觉子系统和空间子系统并存，负责肢体运动信息的存储。

虽然近年来关于肢体运动信息的工作记忆存储机制已经逐渐明朗，但还需要进一步推进该领域的研究。首先，目前尚缺乏身体模式运动与视空间画板之间关系的行为学研究，未来需要这方面的实证研究验证脑成像研究的结果。此外，有研究者探究了简单的点运动——生物运动信息在工作记忆中的存储机制(Ding et al., 2015; Shen et al., 2014; Wood, 2011; Zihl & Heywood, 2015)。具体地说，在计算机中虚拟地将灯放置于运动人体的不同关节处从而生成人体运动动画(生物运动)，实验中要求被试首先记住一组呈现在电脑屏幕上的生物运动刺激，短暂的间隔之后呈现需要反应的生物运动。结果发现生物运动序列不受同时进行的物体颜色和空间任务的影响。生物运动与身体模式运动既有相同点也有所区别：二者都需要个体记住身体形态信息；但二者的复杂程度不同，生物运动是一种简单的运动(点运动)，不同于复杂的人类运动(执行动作的化身)。未来的研究需要直接比较这两种类型的运动，探究二者的神经基础是否相同以限定身体模式运动领域的研究范围。

另外，本文推论工作记忆系统可能还存在一个用于存储肢体运动信息的子系统，其隶属于视空间画板，与视觉子系统和空间子系统并存。这一假说能否成立，仍需进一步探索和检验。未来可通过损伤或虚拟损伤技术分离视觉、听觉与肢体运动感觉以检验“肢体运动系统”在工作记忆系统中的层级。例如，选择视觉与听觉缺失的被试或虚拟诱发被试的视觉与听觉缺失，在此基础上指导被试完成肢体运动的学习，最后检测被试的肢体运动回忆是否激活相关的运动皮层。“肢体运动系统”的功能、研究方式等方面会因其所处的工作记忆系统的层级而有所差异，确定了层级一方面可以更好地进行类比研究(与语音环或视空间画板/与视空间画板的两个子系统)，另一方面也有助于对不同系统进行任务性的分离。

再者，肢体运动主要依赖于肢体的动态感觉，即动觉(Smyth et al., 1988)，除了肢体的动觉外，面部肌肉、眼球等也能产生动觉，这些形式的动觉是与肢体的动觉共同存储，还是存在一个动觉子系统，分别存储不同形式的动觉？未来可通过行为学实验直接检测不同形式的动觉是否相互分离或通过脑成像技术检测它们所依赖的神经基质是否存在差异来探究这一问题。明确这一问题有助于厘清动觉系统各组成部分的特点，从而根据这些特点对动觉采取有针对性的增强措施。

最后，Baddeley (2012)推测触摸觉与动觉共同存储于视空间画板的一个单独子系统中。然而，触摸觉是肤觉与动觉的整合，根据工作记忆四成

分模型(Baddeley, 2000), 整合信息应该存储于情景缓冲器而不是视空间画板中。未来可通过探究触摸觉如何在工作记忆中存储以检验触摸觉与动觉之间的关系。首先可通过探究触摸觉是否与客体特征绑定信息共享缓存区来检验触摸觉是否存储于情景缓冲器中。已知客体特征绑定信息存储于情景缓冲区中(Liu et al., 2019), 如果触摸觉与客体特征绑定信息共享缓冲区, 那么说明触摸觉存储于情景缓冲器中, 其存储独立于动觉。相反, 如果触摸觉与客体特征绑定信息未共享缓冲区, 则还需进一步通过损伤或虚拟损伤技术直接比较触摸觉与动觉的存储关系。明确触摸觉与动觉的关系一方面有助于厘清工作记忆中存储整合信息的成分是否只有情景缓冲区, 从而完善工作记忆多成分模型, 另一方面有助于明确触摸觉与动觉之间的共存性或分离性。

参考文献

董奇, 陶沙. (2004). *动作与心理发展* (pp. 5). 北京师范大学出版社.

李杰. (2010). *视觉工作记忆中表面特征与位置的绑定机制* (博士学位论文). 浙江大学.

宋伟, 董奇, 薛贵, 王亚鹏, 罗良. (2011). *英语两种句子理解中言语工作记忆的作用与布洛卡区功究*. 增强心理学服务社会的意识和功能——中国心理学会成立 90 周年纪念大会暨第十四届全国心理学学术会议论文摘要集.

Allen, R. J., Castellà, J., Ueno, T., Hitch, G. J., & Baddeley, A. D. (2015). What does visual suffix interference tell us about spatial location in working memory? *Memory & Cognition, 43*, 133–142. https://doi.org/10.3758/s13421-014-0448-4

Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences, 4*(11), 417–423. https://doi.org/10.1016/s1364-6613(00)01538-2

Baddeley, A. (2012). Working Memory: Theories, models, and controversies. *Annual Review of Psychology, 63*(1), 1–29. https://doi.org/10.1146/annurev-psych-120710-100422

Baddeley, A. D., Grant, S., Wight, E., & Thomson, N. (1974). Imagery and visual working memory. *In P. M. Rabbitt & S. Dornic* (Eds.), Attention and performance. Vol. 5. New York: Academic Press.

Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (1974). Working memory. In G. A. Bower (Ed.). *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (pp. 47–89). New York: Academic.

Brunetti, R., Del Gatto, C., Cavallina, C., Farina, B., & Delogu, F. (2016). Did I see your hand moving? The effect of movement-related information on the Corsi block tapping task. *Psychological Research, 82*(3), 459–467. https://doi.org/10.1007/s00426-016-0834-6

Cai, Y., Urgolites, Z., Wood, J., Chen, C., Li, S., Chen, A., & Xue, G. (2018). Distinct neural substrates for visual short-term memory of actions. *Human Brain Mapping, 39*(10), 4119–4133. https://doi.org/10.1002/hbm.24236

Carvalho, C. F., Menezes-Filho, J. A., de Matos, V. P., Bessa, J. R., Coelho-Santos, J., Viana, G. F. S., … Abreu, N. (2014). Elevated airborne manganese and low executive function in school-aged children in Brazil. *NeuroToxicology, 45*, 301–308. https://doi.org/10.1016/j.neuro.2013.11.006

Claessen, M. H. G., van der Ham, I. J. M., & van Zandvoort, M. J. E. (2015). Computerization of the standard Corsi block-tapping task affects its underlying cognitive concepts: A pilot study. *Applied Neuropsychology: Adult, 22*(3), 180–188. https://doi.org/10.1080/23279095.2014.892488

Cohen, R. L. (1981). On the generality of some memory laws. *Scandinavian Journal of Psychology, 22*(1), 267–281. https://doi.org/10.1111/j.1467-9450.1981.tb00402.x

Corsi, P. M. (1972). *Human memory and the medial temporal region of the brain*. (Unpublished doctoral dissertation). Mcgill University.

Ding, X., Zhao, Y., Wu, F., Lu, X., Gao, Z., & Shen, M. (2015). Binding biological motion and visual features in working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 41*(3), 850–865. https://doi.org/10.1037/xhp0000061

Farmer, E. W., Berman, J. V. F., & Fletcher, Y. L. (1986). Evidence for a visuo-spatial scratch-pad in working memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A, 38*(4), 675–688. https://doi.org/10.1080/14640748608401620

Fellman, D., Soveri, A., Viktorsson, C., Haga, S., Nylund, J., Johansson, S., … Laine, M. (2017). Selective updating of sentences: Introducing a new measure of verbal working memory. *Applied Psycholinguistics, 39*(2), 275–301. https://doi.org/10.1017/s0142716417000182

Gimenes, G., Pennequin, V., & Sorel, O. (2013). Division of the articulatory loop according to sensory modality using double dissociation. *Journal of Cognitive Psychology, 25*(7), 808–815. https://doi.org/10.1080/20445911.2013.823974

Grafton, S. T., Arbib, M. A., Fadiga, L., & Rizzolatti, G. (1996). Localization of grasp representations in humans by positron emission tomography. *Experimental Brain Research, 112*(1), 103-111. https://doi.org/10.1007/bf00227183

Grainger, C., Williams, D. M., & Lind, S. E. (2013). Online action monitoring and memory for self-performed actions in autism spectrum disorder. *Journal of Autism and Developmental Disorders, 44*(5), 1193–1206. https://doi.org/10.1007/s10803-013-1987-4

Grainger, C., Williams, D. M., & Lind, S. E. (2016).

Recognition memory and source memory in autism spectrum disorder: A study of the intention superiority and enactment effects. *Autism, 21*(7), 812–820. https://doi.org/10.1177/1362361316653364

Grèzes, J., Costes, N., & Decety, J. (1999). The effects of learning and intention on the neural network involved in the perception of meaningless actions. *Brain, 122*(10), 1875–1887. https://doi.org/10.1093/brain/122.10.1875

Gunduz Can, R., Schack, T., & Koester, D. (2017). Movement interferes with visuospatial working memory during the encoding: An ERP study. *Frontiers in Psychology, 8*, 871. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00871

Kantak, S. S., Sullivan, K. J., Fisher, B. E., Knowlton, B. J., & Winstein, C. J. (2010). Neural substrates of motor memory consolidation depend on practice structure. *Nature Neuroscience, 13*(8), 923–925. https://doi.org/10.1038/nn.2596

Koester, D., Schack, T., & Westerholz, J. (2016). Neurophysiology of grasping actions: Evidence from ERPs. *Frontiers in Psychology, 7*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01996

Liu, S., & Wang, L. (2018). The association of motor information and verbal information: A new perspective on the mechanism of the SPT effect. *Journal of Cognitive Psychology, 30*(3), 321–335. https://doi.org/10.1080/20445911.2018.1443463

Liu, Y., Lu, X., Wu, F., Shen, M., & Gao, Z. (2019). Biological motion is stored independently from bound representation in working memory. *Visual Cognition*, *27*(9-10), 701–713. https://doi.org/10.1080/13506285.2019. 1638479

Logie, R. H. (1986). Visuo-spatial processing in working memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A, 38*(2), 229–247. https://doi.org/10.1080/14640748608401596

Logie, R. H. (1995). *Visuo-spatial working memory*. Hove: Lawrence Erlbaum Associates.

Malhotra, P., Coulthard, E. J., & Husain, M. (2009). Role of right posterior parietal cortex in maintaining attention to spatial locations over time. *Brain, 132*(3), 645–660. https://doi.org/10.1093/brain/awn350

Milner, B. (1971). Interhemispheric differences in the localization of psychological processes in man. *British Medical Bulletin, 27*(3), 272–277. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.bmb.a070866

Miyahara, M., Leeder, T., Francis, G., & Inghelbrecht, A. (2008). Does an instruction of a verbal labeling strategy for hand movements improve general motor coordination as well as the gestural performance? *Clinical Case Studies, 7*(3), 191–207. https://doi.org/10.1177/1534650107306876

Moar, I. T. (1978). *Mental triangulation and the nature of internal representations* (Unpublished doctorial dissertation). University of Cambridge.

Rizzolatti, G. (2005). The mirror neuron system and its function in humans. *Anatomy and Embryology, 210*(5-6), 419–421. https://doi.org/10.1007/s00429-005-0039-z

Rizzolatti, G., Fadiga, L., Matelli, M., Bettinardi, V., Paulesu, E., Perani, D., & Fazio, F. (1996). Localization of grasp representations in humans by PET: 1. Observation versus execution. *Experimental Brain Research, 111*(2), 246–252. https://doi.org/10.1007/bf00227301

Rumiati, R. I., Weiss, P. H., Tessari, A., Assmus, A., Zilles, K., Herzog, H., & Fink, G. R. (2005). Common and differential neural mechanisms supporting imitation of meaningful and meaningless actions. *Journal of Cognitive Neuroscience, 17*(9), 1420–1431. https://doi.org/10.1162/0898929054985374

Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review, 82*(4), 225–260. https://doi.org/10.1037/h0076770

Scholl, B. J., Pylyshyn, Z. W., & Franconeri, S. L. (1999). When are featural and spatiotemporal properties encoded as a result of attentional allocation? *Investigative Ophthalmology & Visual Science, 40*(4), S797–S797.

Sdoia, S., Di Nocera, F., & Ferlazzo, F. (2019). Memory for positional movements as a component of the visuospatial working memory. *Cognitive Processing, 20*, 363–369. https://doi.org/10.1007/s10339-019-00917-y

Shah, D. S., Prados, J., Gamble, J., de Lillo, C., & Gibson, C. L. (2013). Sex differences in spatial memory using serial and search tasks. *Behavioural Brain Research, 257*, 90–99. https://doi.org/10.1016/j.bbr.2013.09.027

Shen, M., Gao, Z., Ding, X., Zhou, B., & Huang, X. (2014). Holding biological motion information in working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 40*(4), 1332–1345. doi:10.1037/a0036839

Smyth, M. M., Pearson, N. A., & Pendleton, L. R. (1988). Movement and working memory: Patterns and positions in space. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A: Human Experimental Psychology, 40*(3), 497–514. https://doi.org/10.1080/02724988843000041

Smyth, M. M., & Pendleton, L. R. (1989). Working memory for movements. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A, 41*(2), 235–250. https://doi.org/10.1080/14640748908402363

Son, G., Oh, B. I., Kang, M. S., & Chong, S. C. (2020). Similarity-based clusters are representational units of visual working memory. *Journal of Experimental Psychology Learning Memory and Cognition, 46*(1), 46–59. https://doi.org/10.1037/xlm0000722

Spiegel, M. A., Koester, D., & Schack, T. (2013). The functional role of working memory in the (re-)planning and execution of grasping movements. *Journal of*

Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 39(5), 1326–1339. https://doi.org/10.1037/a0031398

Tarantino, V., de Sanctis, T., Straulino, E., Begliomini, C., & Castiello, U. (2014). Object size modulates fronto-parietal activity during reaching movements. *European Journal of Neuroscience, 39*(9), 1528–1537. https://doi.org/10.1111/ejn.12512

Ungerleider, L. G., Courtney, S. M., & Haxby, J. V. (1998). A neural system for human visual working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 95*(3), 883–890. https://doi.org/10.1073/pnas.95.3.883

Vogan, V. M., Francis, K. E., Morgan, B. R., Smith, M. L., & Taylor, M. J. (2018). Load matters: Neural correlates of verbal working memory in children with autism spectrum disorder. *Journal of Neurodevelopmental Disorders, 10*(1), 19. https://doi.org/10.1186/s11689-018-9236-y

Wickelgren, W. A. (1965). Short-term memory for phonemically similar lists. *American Journal of Psychology, 78*(4), 567–574. https://doi.org/10.2307/1420917

Williams, D. (2010). Theory of own mind in autism. Autism, *14*(5), 474–494. https://doi.org/10.1177/1362361310366314

Wood, J. N. (2011). A core knowledge architecture of visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 37*(2), 357–381. https://doi.org/10.1037/a0021935

Wu, Y. C, & Coulson, S. (2014). A psychometric measure of working memory capacity for configured body movement. *PLoS ONE, 9*(1), e84834. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084834

Zhao, Y., Kuai, S., Zanto, T. P., & Ku, Y. (2019). Neural correlates underlying the precision of visual working memory. *Neuroscience, 425*, 301–311. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2019.11.037

Zihl, J., & Heywood, C. A. (2015). The contribution of LM to the neuroscience of movement vision. *Frontiers in Integrative Neuroscience, 9*, 6. https://doi.org/10.3389/fnint.2015.00006

How is limb movement information stored in working memory?

XIE Tingting[1], WANG Lijuan[1], WANG Tianze[2]

([1] *School of Psychology, Northeast Normal University, Changchun* 130024, *China*)

([2] *Faculty of Education, Guangxi Normal University, Guilin* 541006, *China*)

Abstract: Limb movements (movement to positions in space and body movement patterns) are one of the important ways individuals interact with their environment. Previous behavioral studies and neuroimaging studies explored the storage of information of movement to positions and body movement patterns information, respectively. They found that the storage of two kinds of limb movement information is independent of the phonological loop and the visual subsystem in the visuospatial sketchpad and needs the participation of the spatial subsystem in the visuospatial sketchpad; movement to positions in space and body movement patterns activate different movement-related cortexes that are independent of the phonological loop, the visual subsystem and the spatial subsystem in the visuospatial sketchpad. These results show that the existing multicomponent model of working memory cannot fully explain the storage of limb movement information. It is implied that there is a "limb movement system" in the working memory system that is specific to limb movement information, belongs to visuospatial sketchpad and coexists with the visual subsystem and spatial subsystem. The brain areas activated in the "limb movement system" vary with different kinds of limb movements.

Key words: body movement information, movement to positions in space, body movement patterns, spatial working memory, movement-related cortex